塔里木河流域水储量变化及绿洲生态安全评估

张齐飞[1,2]， 陈亚宁[2]， 孙从建[1,2]， 向燕芸[3]， 郝海超[4]

（1. 山西师范大学地理科学学院，山西 太原 030031；2. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；3. 山西财经大学公共管理学院，山西 太原 030006；4. 华东师范大学地理科学学院，上海 200241）

摘　要：绿洲是干旱、半干旱地区最具生态敏感性和独特性的景观类型，是维系人类生存和社会经济发展的重要区域。然而，在气候变化与人类活动双重影响下，干旱区水资源及其绿洲生境正发生剧烈变化。基于2000—2020年MODIS、GRACE卫星数据、土地利用数据和气象观测资料，通过计算植被覆盖度，估算植被初级生产力（NPP）和遥感生态指数（RSEI），系统分析了过去20 a塔里木河（简称塔河）流域陆地水储量和绿洲的动态变化并完成了绿洲区生态安全评估。结果表明：（1）2002—2020年塔河流域陆地水储量以0.27 mm·月$^{-1}$的速率减少，空间上塔河流域陆地水储量在北部和西部区域显著减少，而在南部区域显著增加。（2）2000—2020年塔河流域绿洲面积显著增加，面积增加6.49%（0.42×10^4 km^2）。塔河流域整体生态环境呈转好趋势，生态等级由较差级别转为中等级别，生态改善区占总流域面积的69%，而生态退化区面积不足5%。塔河流域归一化植被指数（NDVI）由2000年的0.13增至2020年的0.16，近20 a植被覆盖度增加36.79%，NPP增加31.55%。（3）气温升高和降水增多的同时伴随下游河川径流增加，这进一步加剧了塔河流域陆地水资源储量的时空差异性，但人类活动仍是绿洲显著扩张最根本的原因。

关 键 词：陆地水储量；绿洲动态变化；生态安全评估；塔里木河流域

文章编号：1000－6060(2024)01－0001－14(0001～0014)

绿洲是干旱、半干旱区脆弱生态环境内最具生态敏感性的一种复杂地理景观，承载了干旱地区人类生产、生活和经济活动，是维系人类生存和发展的重要场所。绿洲也是抵御沙漠入侵和干旱的天然生态堡垒[1]，对气候变化有着重要的预警和指示作用[2]，在干旱区发挥显著的冷/湿岛效应、风屏效应、增雨效应和逆湿效应[3]。气候变化导致全球干旱区荒漠化进程加快[4]，干旱区水资源问题也越来越突出，绿洲生境正发生剧烈变化[1]，进一步造成生态系统结构受损和功能紊乱[5-6]。气候变化对绿洲发展、区域水资源分配和生态安全产生巨大挑战[7]，迫切需要加强干旱区绿洲动态变化监测及其影响评估。

干旱区绿洲演变过程及生态安全机制一直是国内外学者关注的热点，但大多研究基于多源遥感数据实施绿洲动态监测[8-10]。Pei等[11]和Liu等[12]基于多源遥感数据，实现了内蒙古和新疆植被动态度变化的监测。此外，一些研究基于土地利用动态度模型对植被的动态变化进行分析，如Shi等[13]利用土地利用动态度模型和转移矩阵对江苏省土地覆被变化进行研究；Sun等[1]利用CA-Markov模型实现了塔里木河（简称塔河）流域沙漠-绿洲交错带植被动态变化预测；Zhang等[14]基于CASA模型计算植被净初级生产力（NPP）来反映中亚干旱区植被生态状况。目前，一些研究通过遥感生态安全评价来反映植被生态状况，如Gao等[15]基于遥感生态指数（RSEI）及标准差椭圆算法对哈密绿洲区的生态质量进行监测；Wang等[16]通过开发干旱区RSEI，实现

收稿日期：2023-05-29； **修订日期**：2023-06-25
基金项目：第三次新疆综合科学考察项目（2022xjkk0100）资助
作者简介：张齐飞（1989-），男，博士，副教授，主要从事干旱区生态水文过程研究. E-mail: zhangqifei15@mails.ucas.ac.cn
通讯作者：孙从建（1986-），男，博士，教授，主要从事气候变化与水循环研究. E-mail: suncongjian@sina.com

了对咸海地区生态环境质量时空动态变化研究。在生态安全评估方面，相关学者通过改进三维生态足迹模型评价天山北麓绿洲的生态安全或基于加权平均法构建绿洲城市土地生态安全动态评价模型[17]。目前，干旱区绿洲动态变化与生态安全已经有了相关研究，但从系统和水资源影响角度分析绿洲的动态变化过程还亟需更多探究。

因此，本研究选取对气候变化和人类活动影响较为敏感、丝绸之路经济带核心区的塔河流域绿洲区为研究靶区，基于2000—2020年的气温、降水、陆地水储量和多源遥感数据，通过MODIS多源遥感数据、GRACE重力卫星和绿洲动态指数对近20 a塔河流域陆地水储量以及绿洲的时空动态演变特征进行分析，并通过NPP和RSEI等指标对其生态安全进行了评估。该研究对于干旱荒漠区的生态保育恢复治理、绿洲健康发展和国家丝绸之路经济带建设具有重要意义。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

塔河流域地处欧亚大陆腹地，位于中国西北、新疆南部(图1)，为中国最大的内陆盆地，由天山、昆仑山、阿尔金山环绕，流域面积约92.60×10⁴ km²。该区由九大水系(开都–孔雀河、迪那河、渭干–库车河、阿克苏河、喀什噶尔河、叶尔羌河、和田河、策勒–克里雅河和车尔臣河)144条河流构成，最后汇入台特玛湖(表1)。现今补给塔河干流的仅有叶尔羌河、和田河、开都河和阿克苏河4条支流，水源补给主要来自周边高山区的冰川、积雪融水、中山带森林降水以及低山带基岩裂隙水[18-19]。流域海拔范围773~8323 m，由高山、雪山、河谷草原、戈壁沙漠和低地绿洲构成，沙漠占主导，全年干旱少雨，1979—2020年平均降水量53 mm，平均气温3.9 ℃。

1.2 数据来源

本研究选用归一化植被指数(NDVI)、植被覆盖度、NPP和RSEI这4个绿洲指标探究绿洲动态变化特征。2000—2020年NDVI来自MOD13Q1数据，时间分辨率为16 d，空间分辨率为250 m。NPP基于CASA模型，通过MOD13A1、MOD15A2H、MCD15A3H、Terraclimate以及Gladas/T3H等遥感数据计算得出。RSEI的计算中用到的数据还有MOD09A1和MOD11A2数据。土地利用数据来自中国科学院资源环境数据云平台(http://www.gscloud.cn)提供的2000、2005、2015年和2020年中国土地利用数据(1 km×1 km)。气象站点气温和降水数据来自中国气象数据网(http://cdc.cma.gov.cn)。陆地水储量数据由得克萨斯大学空间研究中心(CSR，http://www2.csr.utexas.edu/grace/RL06_mascons.html)提供的2002年4月—2020年12月GRACE重力卫星数据反演获取，数据空间分辨率为0.25°×0.25°。研究缺失



图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

表1 塔里木河流域绿洲区主要河流水文信息

Tab. 1 Hydrological information of main rivers in the oases of the Tarim River Basin

水系序号	流域	绿洲范围面积/km²	水文站	流域面积/km²	年均径流量/10⁸ m³	冰川占比/%
1	开孔河(开都河-博斯腾湖)	6901.08	大山口	19022	41.65	1.21
	开孔河(孔雀河)	4074.80	塔什店	33200	14.44	0.00
2	迪那河	1882.67	迪那河	5193	1.95	0.43
3	渭干-库车河	9415.49	黑孜、卡拉苏、拜城、卡木鲁克、破城子、托克逊	10774	29.67	15.12
4	阿克苏河	15634.70	协合拉、沙里桂兰克	50000	79.89	3.52
5	喀什噶尔河	16025.20	恰其嘎、卡浪沟吕克、维他克、克勒克、卡拉贝利、沙曼	28659	66.52	5.80
6	叶尔羌河	17410.10	卡群	50248	67.85	1.45
7	和田河	9066.15	乌鲁瓦提、同古孜洛克	34558	46.08	5.34
8	策勒-克里雅河	4115.07	策勒	9390	9.78	5.23
9	车尔臣河	5408.91	且末	26822	6.63	1.98

的数据由缺失月份的多年累积平均和相邻月份的平均值对缺值月份进行填补，水储量变化是基于Mascons方法获得，距平基准期为时间序列完整的2002—2020年。

1.3 研究方法

1.3.1 植被覆盖度 本研究采用混合像元二分模型来计算植被覆盖度，该算法的假设是基于每个像元的NDVI由植被和土壤2部分构成[11]，公式如下：

$$NDVI=fNDVI_V+(1-f)NDVI_S \quad (1)$$

式中：f为植被覆盖度(%)；$NDVI_V$为完全被植被覆盖像元的NDVI；$NDVI_S$为土壤像元或无植被覆盖像元的NDVI。本文基于MOD13Q1影像，将研究区内NDVI最大值作为$NDVI_V$，最小值作为$NDVI_S$计算植被覆盖度。根据植被特征，将流域植被覆盖度划分为：高植被覆盖区(≥75%)、较高植被覆盖区(50%~75%)、中植被覆盖区(25%~50%)、低植被覆盖区(0~25%)。

1.3.2 CASA模型 本文采用修正的光能利用模型CASA模型结合GEE(Google Earth Engine)大数据引擎估算NPP，输入的数据包括月均温、月降水、月太阳辐射、植被类型及NDVI由Potter在1993年提出[20]，表达式为：

$$NPP(x,t)=APAR(x,t)\times\varepsilon(x,t) \quad (2)$$

式中：$NPP(x,t)$为t月、x像元处植被的净第一性生产力($g\ C\cdot m^{-2}$)；$APAR(x,t)$为t月、x像元处植被的光合有效辐射($MJ\cdot m^{-2}$)；$\varepsilon(x,t)$为t月、x像元处植被的实际光能利用率($g\ C\cdot MJ^{-1}$)。

1.3.3 遥感生态指数(RSEI) RSEI指数综合了绿度、湿度、热度、干度4个评价指标，分别由NDVI、湿度指数(WET)、温度指数(LST)、裸土指数(NDBSI)通过主成分分析方法，得到生态遥感指数(RSEI)的初始值$RSEI_0$[16]。计算公式如下：

$$RSEI=q(NDVI, WET, LST, NDBSI) \quad (3)$$

$$RSEI_0=1-PC1[q(NDVI, WET, LST, NDBSI)] \quad (4)$$

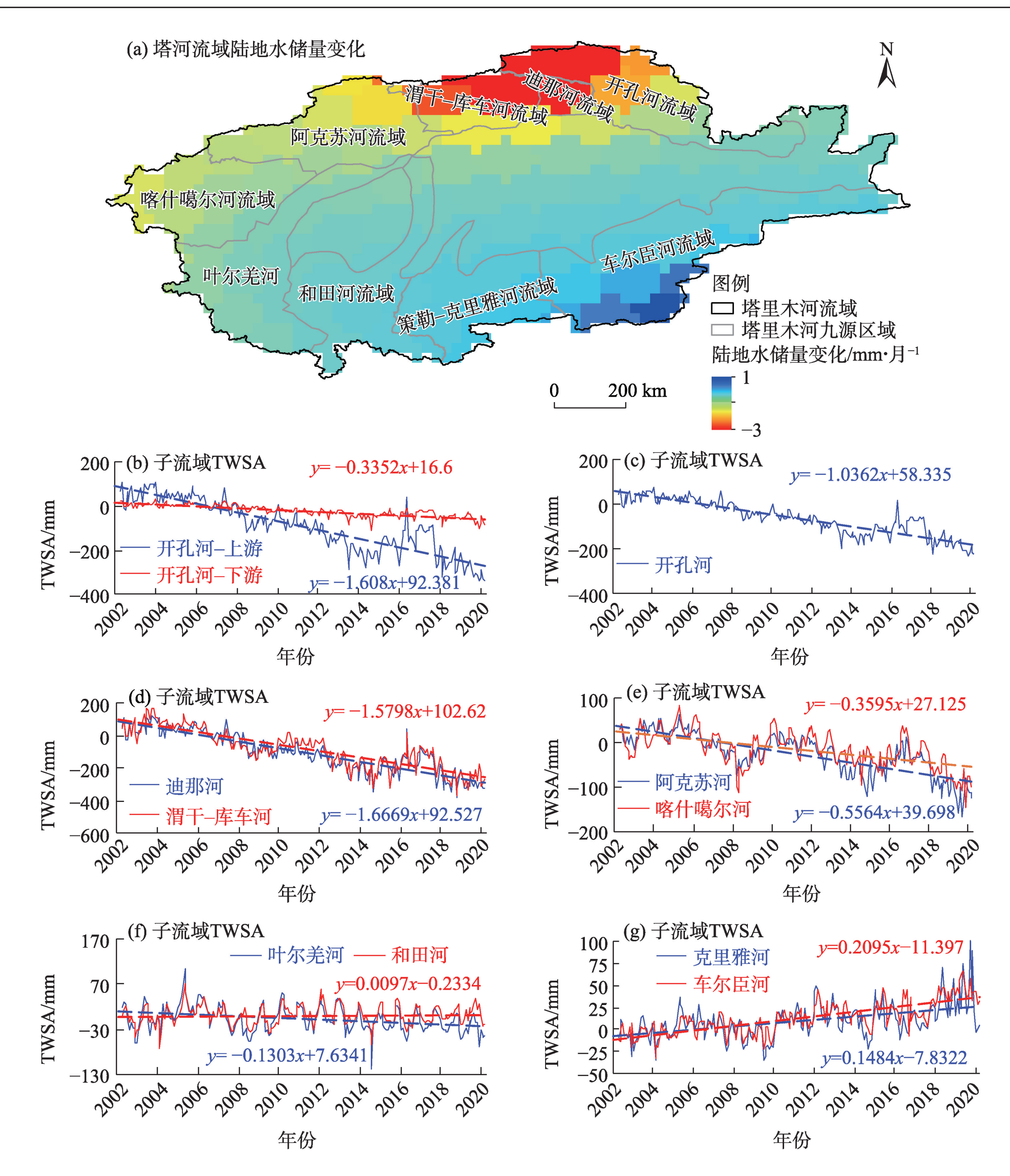
$$RSEI=(RSEI_0-RSEI_{min})/(RSEI_{max}-RSEI_{min}) \quad (5)$$

式中：q为4个指标的组合：PC1为4个指标第一主成分分析结果；$RSEI_{min}$和$RSEI_{max}$分别为$RSEI_0$的最小值和最大值。本文将RSEI划分为5个等级：差[0.0, 0.2)、较差[0.2, 0.4)、中等[0.4, 0.6)、良好[0.6, 0.8)和优秀[0.8, 1.0)；RSEI的差值同样划分5个等级：严重退化区(-∞, -0.2)、轻微退化区[-0.2, -0.05)、稳定区[-0.05, 0.05)、轻微改善区[0.05, 0.2)和显著改善区[0.2, +∞)。

2 结果与分析

2.1 陆地水储量变化特征

2002—2020年塔河流域陆地水储量距平(TWSA)呈显著下降趋势($P<0.01$)，下降速率为0.27 mm·月⁻¹。季节上，四季TWSA均表现显著下降趋势($P<0.01$)，春季、夏季、秋季和冬季TWSA下降速率分别为-3.26 mm·a⁻¹、-3.25 mm·a⁻¹、-3.17 mm·a⁻¹和-2.99 mm·a⁻¹。大部分区域的水储量减少速率不足1 mm·月⁻¹，但北部天山和西部帕米尔高原地区陆地水储量呈现急剧减少(图2a)，达-3~-1 mm·月⁻¹。2000—2020年北部开孔河、迪那河、渭干-库车河和阿克苏河流域TWSA下降速率分别达-1.04 mm·月⁻¹、-1.67 mm·月⁻¹、-1.58 mm·月⁻¹和-0.56 mm·月⁻¹。西



注:TWSA 为陆地水储量距平。

图2 2002年4月—2020年12月塔河流域及子流域陆地水储量变化趋势

Fig. 2 Change trend of TWSA in the Tarim River Basin and sub-basins from April in 2002 to December in 2020

部喀什噶尔河流域TWSA下降速率为−0.36 mm·月$^{-1}$，西南部叶尔羌河流域TWSA下降速率达−0.13 mm·月$^{-1}$，和田河流域整体TWSA在过去20 a无明显变化。2000—2020年塔河南部和西南部的策勒–克里雅河和车尔臣河流域TWSA表现为显著的增长态势（P<0.01），增加速率分别为0.15 mm·月$^{-1}$和0.21 mm·月$^{-1}$。

2.2 绿洲动态变化特征

2000—2020年塔河流域九源绿洲区面积表现为显著扩张态势（图3），扩张面积约0.42×10^4 km^2（6.49%），其中北部天山地区的博斯腾湖、孔雀河、渭干–库车河、阿克苏河流域绿洲面积分别扩张了274 km^2（6.35%）、240 km^2（7.01%）、282 km^2（3.90%）和1138 km^2（9.77%）；西部喀什噶尔河流域绿洲面积扩张了880 km^2（8.37%）；南部的叶尔羌河、和田河和车尔臣河流域绿洲面积分别扩张了553 km^2（3.98%）、91 km^2（1.46%）和965 km^2（38.68%）。

2.2.1 绿洲NDVI变化 2000—2020年塔河九源绿洲区NDVI均表现出显著的增加趋势（P<0.01，图4）。其中，博斯腾湖、孔雀河、迪那河、渭干–库车河

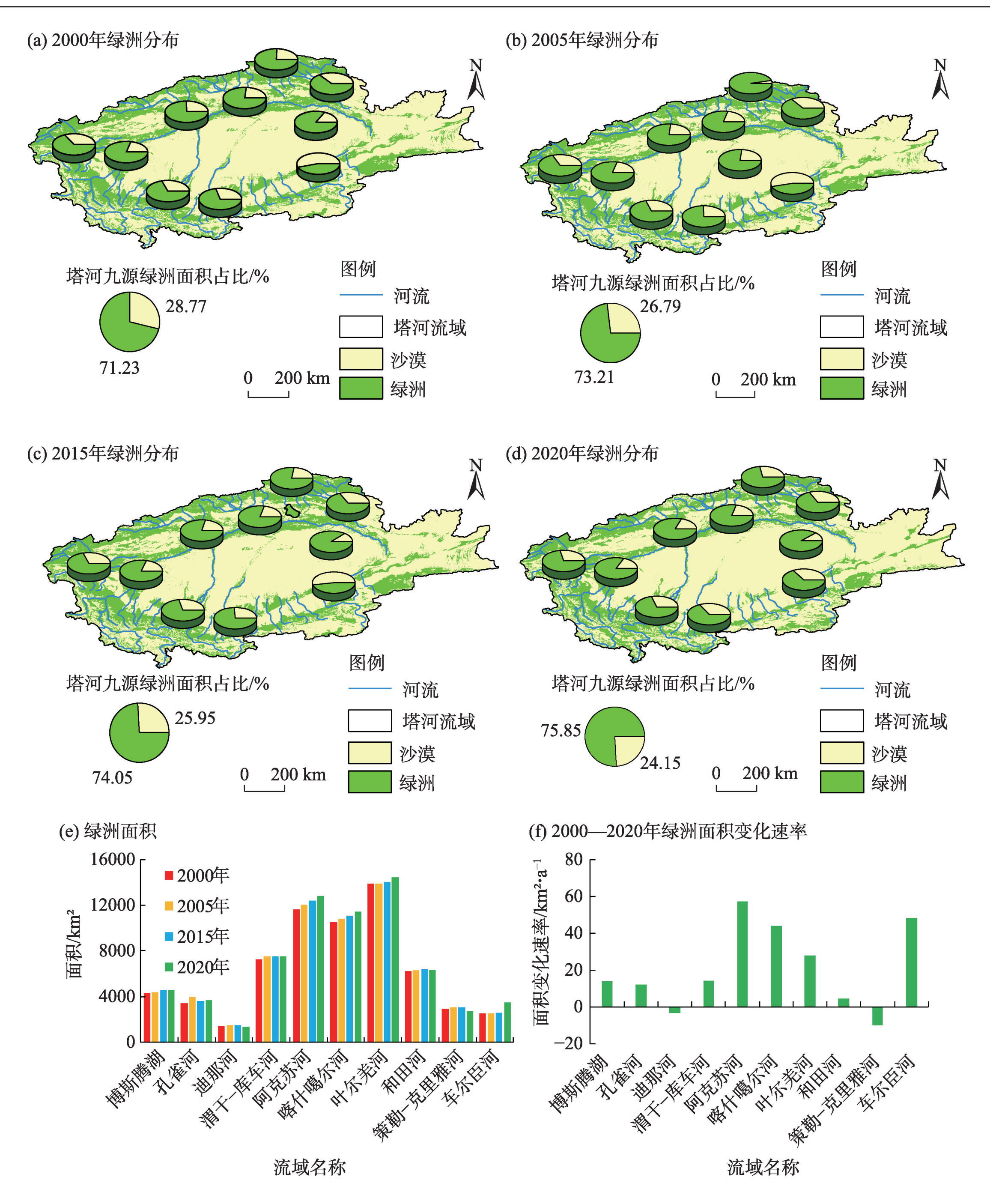


图3　2000—2020年塔河流域绿洲区时空分布和面积变化

Fig. 3　Spatiotemporal distribution and area changes of the oases in the Tarim River Basin during 2000—2020

和阿克苏河绿洲区NDVI分别增加了38.42%、80.30%、55.25%、50.89%和51.61%；喀什噶尔河绿洲区NDVI增加了51.48%；南部的叶尔羌河、和田河、策勒-克里雅河和车尔臣河绿洲区NDVI分别增加了30.38%、32.51%、21.84%和21.73%。Hurst指数显示未来塔河大部分区域将转好，其中博斯腾湖、阿克苏河、叶尔羌河、渭干-库车河、喀什噶尔河、策勒-克里雅河和车尔臣河流域绿洲区约有54%~75%的区域NDVI减少，和田河绿洲区高达91.15%的区域NDVI将会减少。Hurst指数显示迪那河和孔雀河流域绿洲区51%和63%的区域未来NDVI呈现增加态势。

2.2.2　绿洲植被覆盖度变化　2000—2020年塔河流域绿洲区植被覆盖度呈显著上升趋势（P<0.01，图5），其中，北部的开孔河和阿克苏河绿洲区植被覆盖度增加速率最高，分别达1.20%·a^{-1}和0.85%·a^{-1}（P<0.01），南部策勒-克里雅河增加速率较缓

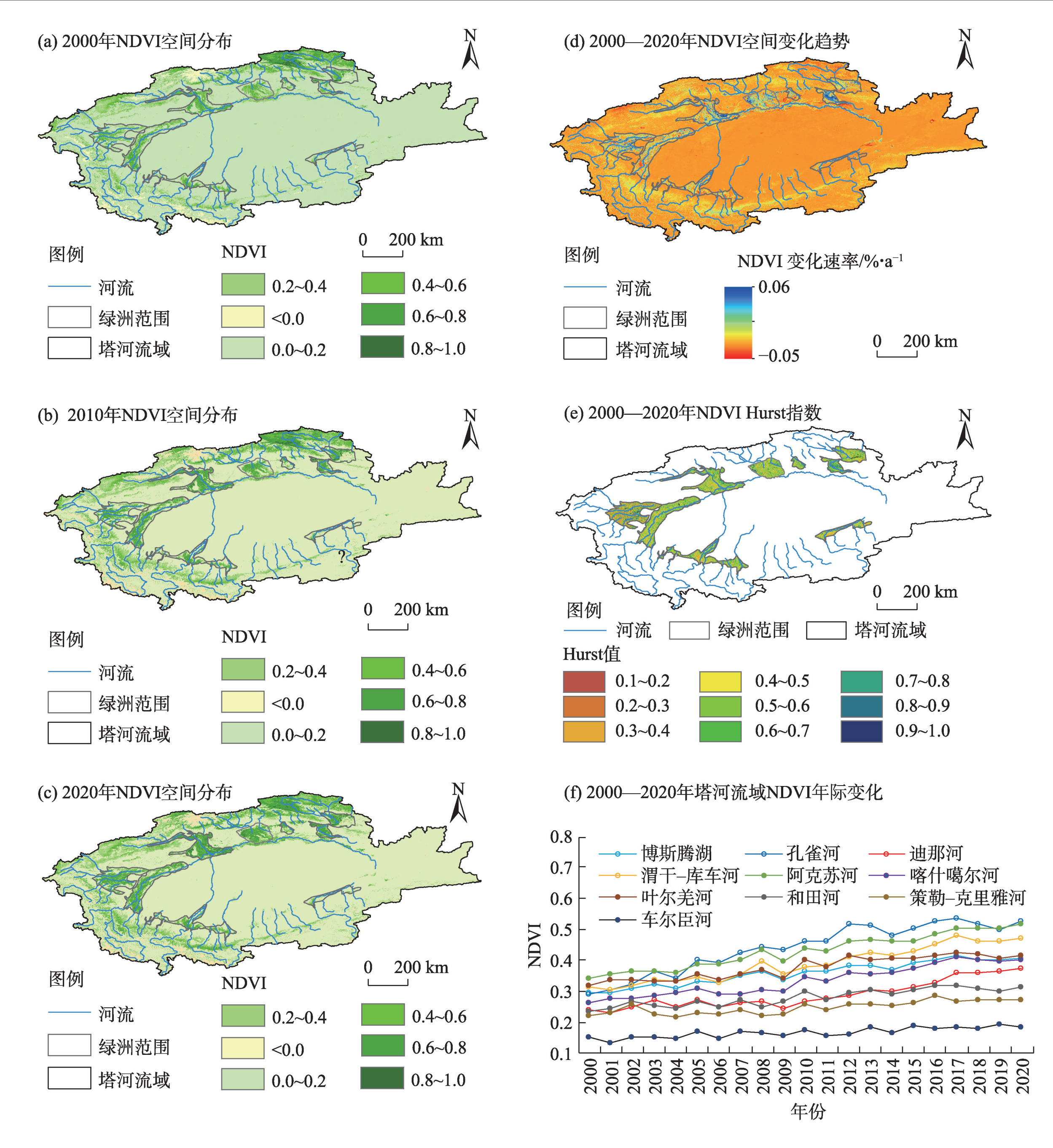


图4 2000—2020年塔河流域绿洲区归一化植被指数(NDVI)时空变化

Fig. 4 Spatiotemporal variations of NDVI in the oases of the Tarim River Basin during 2000—2020

(0.21%·a^{-1}, P<0.05)。2000—2020年塔河流域高、较高和中等植被覆盖度面积均呈现显著上升态势(P<0.01),近20 a扩张速率分别达8.28%·a^{-1}、2.53%·a^{-1}和7.26%·a^{-1},而低植被覆盖度面积却呈现减少态势(−0.25%·a^{-1})。2000—2020年塔河流域北部高、较高植被覆盖度面积增加显著(P<0.05),增加速率分别为63.84 km^2·a^{-1}和5.71 km^2·a^{-1}(博斯腾湖绿洲区)、79.87 km^2·a^{-1}和24.66 km^2·a^{-1}(孔雀河绿洲区)、6.82 km^2·a^{-1}和15.75 km^2·a^{-1}(迪那河绿洲区)、132.11 km^2·a^{-1}和46.43 km^2·a^{-1}(渭干–库车河绿洲区)、179.47 km^2·a^{-1}和99.40 km^2·a^{-1}(阿克苏河绿洲区)。塔河南部绿洲区低植被覆盖度面积均呈现显著减少态势(P<0.01),叶尔羌河、和田河、策勒–克里雅河和车尔臣河流域绿洲面积分别以−198.45 km^2·a^{-1}、−37.48 km^2·a^{-1}、−11.10 km^2·a^{-1}和−19.49 km^2·a^{-1}速率减少。

2.2.3 绿洲NPP年际变化特征 2000—2020年塔河九源绿洲区NPP均表现出显著增加态势(P<0.01,

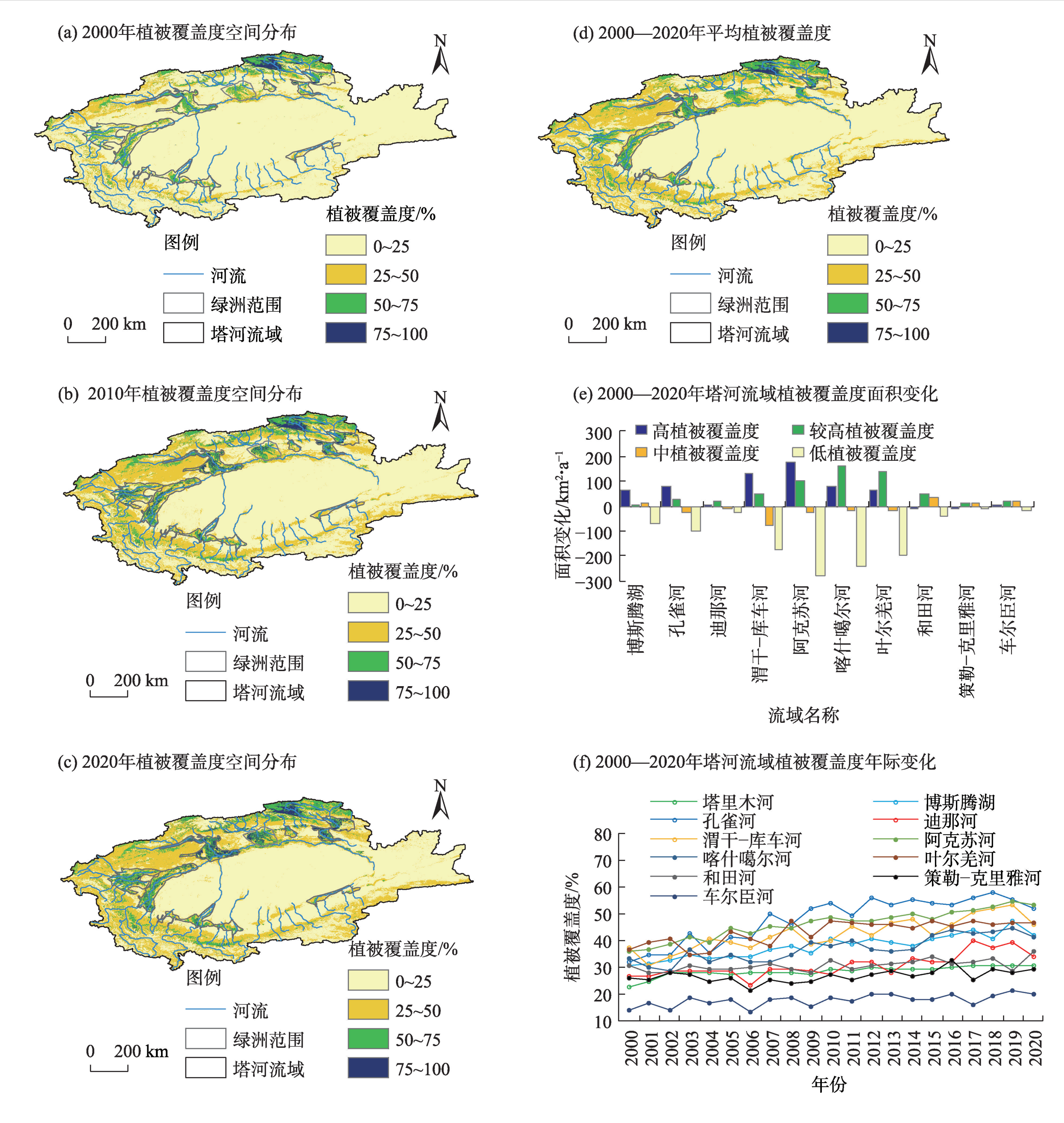


图5　2000—2020年塔河流域绿洲区植被覆盖度变化

Fig. 5　Spatiotemporal variations of the fraction of vegetation cover in the oases of the Tarim River Basin during 2000—2020

图6），NPP由2000年的26.16 g C·m^{-2}增至2020年的34.41 g C·m^{-2}，近20 a NPP增加31.55%。相比2000年，2020年塔河流域各绿洲区NPP尤其山区NPP增加显著。北部的博斯腾湖、孔雀河、迪那河、渭干–库车河和阿克苏河绿洲区NPP在2000—2020年增加速率分别达2.26 g C·m^{-2}·a^{-1}、4.30 g C·m^{-2}·a^{-1}、1.39 g C·m^{-2}·a^{-1}、3.12 g C·m^{-2}·a^{-1}和2.86 g C·m^{-2}·a^{-1}，近20 a NPP分别增加98.51%、219.06%、12.67%、82.12%和56.13%；西部喀什噶尔河绿洲区NPP近20 a增加速率达2.38 g C·m^{-2}·a^{-1}(71.28%)；南部叶尔羌河、和田河、策勒–克里雅河和车尔臣河绿洲区NPP在2000—2020年增加速率达2.03 g C·m^{-2}·a^{-1}、1.39 g C·m^{-2}·a^{-1}、0.86 g C·m^{-2}·a^{-1}和0.46 g C·m^{-2}·a^{-1}，分别增加了66.42%、49.56%、32.02%和17.18%。基于Hurst指数分析，未来塔河北部渭干–库车河、塔河南部的叶尔羌河、和田河、策勒–克里雅河和车尔臣河绿洲区NPP将呈现减少趋势，尤其是和田河绿洲区(Hurst=0.27)。图6e显示，博斯腾湖、阿克苏河、叶

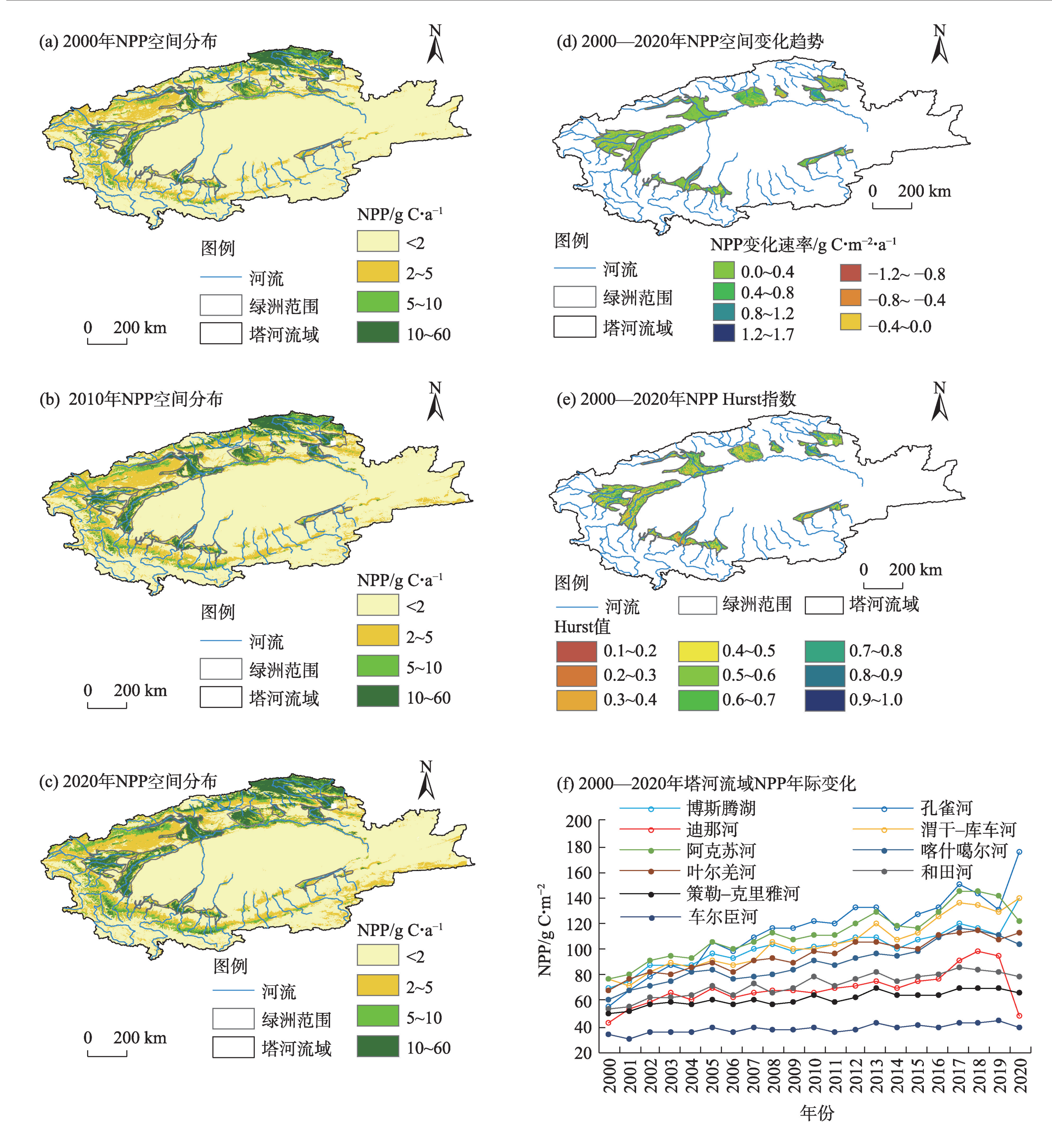


图6 2000—2020年塔河流域绿洲区植被初级生产力(NPP)时空变化

Fig. 6 Spatiotemporal variations of NPP in the oases of the Tarim River Basin during 2000—2020

尔羌河、孔雀河、迪那河、渭干–库车河、喀什噶尔河、策勒–克里雅河和车尔臣河绿洲区在未来50%以上区域NPP仍将呈现增加趋势，阿克苏河、孔雀河和迪那河绿洲区更是高达64.52%、79.49%和75.96%，和田河绿洲未来有50%以上(51.25%)区域NPP减少。

2.3 绿洲生态效应评价

2000—2020年塔河流域生态整体转好(图7)，生态等级由较差级别转为中等级别，RSEI从2000年的0.28增至2020年的0.43。北部的博斯腾湖、孔雀河、迪那河、渭干–库车河和阿克苏河绿洲区RSEI分别从2000年的0.33、0.37、0.31、0.31和0.39增至2020年的0.45、0.71、0.36、0.70和0.55，近20 a分别增长了35.63%、90.86%、16.23%、123.32%和42.53%；西部喀什噶尔河绿洲区RSEI由2000年的0.31增至2020年的0.47，增长了50.32%；塔河流域南部的叶

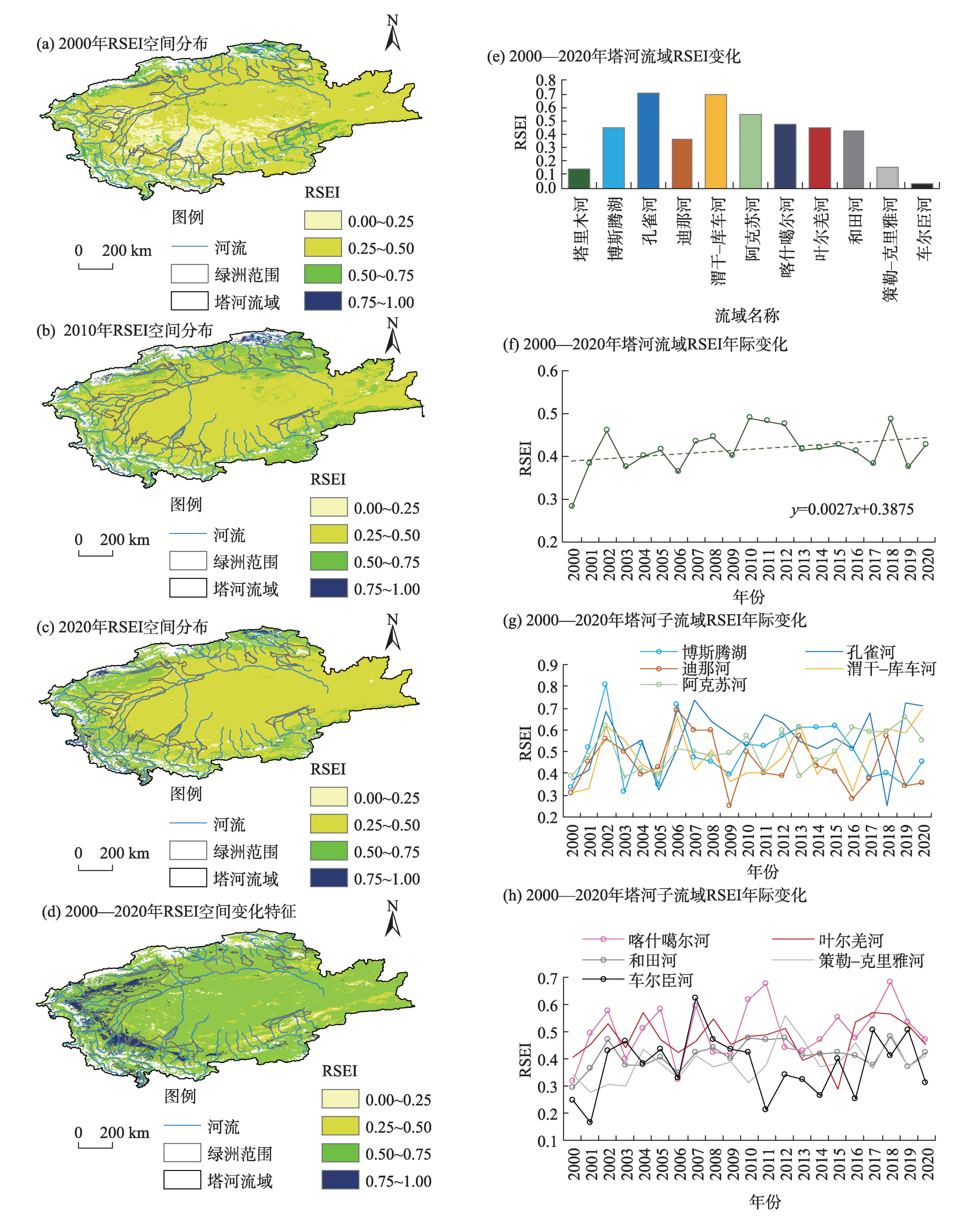


图7　2000—2020年塔里木河流域绿洲区遥感生态指数(RSEI)时空变化

Fig. 7　Spatiotemporal variations of RSEI in the oases of the Tarim River Basin during 2000—2020

尔羌河、和田河、策勒–克里雅河和车尔臣河流域绿洲区 RSEI 分别从 2000 年的 0.41、0.29、0.34 和 0.24 增至2020年的0.45、0.42、0.41和0.31，近20 a分别增长了10.81%、45.02%、22.26%和27.57%。

与2000年相比，2020年塔河流域生态条件差和较差的区域面积减幅达86.87%和22.96%，生态条件

良好和优秀的区域面积增幅达140.02%。2000—2020年,塔河流域生态退化区面积(严重退化区+轻微退化区)约占总流域面积的5%,稳定区面积占26.08%,轻微改善区面积占62.69%,显著改善区面积占6.23%。塔河流域绿洲区多集中在稳定区和轻微改善区,其覆盖区域面积占总流域的90%左右,其退化区面积均不超过总面积的5%,其严重退化区面积均不超过2%。

3 讨论

3.1 自然因素

2000—2020年塔河流域气温和降水空间差异显著(图8),渭干-库车河和阿克苏河流域呈显著升温态势,而北部开都河流域和西部的帕米尔高原等地区温度呈下降趋势。降水变化则以增多为主,流域内绝大多数(66.67%)站点降水呈现增长态势,尤其是塔河流域的西南区域。受气温和降水变化影响,塔河流域水储量年际变化也存在显著的空间差异。流域北部天山山区气温上升加速了该区域的冰川退缩和积雪消融[21-22],从而造成山区水资源储量减少。塔河流域气象站点主要分布在低海拔区域(海拔1500 m以下),海拔2000 m以上站点较少,站点数据表明过去20 a塔河流域低海拔区域温度呈下降趋势,但无法客观反映高海拔区域气温变化幅度。Gao等[23]通过实地监测发现天山地区随着海拔高度的上升,多年温度呈现显著的上升趋势,特别是海拔高度在3000 m和4000 m以上的区域,温度升高更为强烈。气温上升加速了天山山区冰雪消融,在补给下游河川径流的同时,山区固态水体也在急剧减少,而这也造成了天山地区水储量的减少[21,24-26]。如1969—2014年开都河上游冰川面积退缩速率达0.76 %·a^{-1}[24],伴随融雪期明显延长(春季提前和秋季延迟)[25]。也有研究表明,1960—2010年阿克苏河流域和开都河流域的径流均呈增加趋势,主要是由冰川融水径流增加所致,而冰川急剧退缩是天山山区水储量减少的主要原因[26]。

在塔河流域南部喀喇昆仑山区域,降水主要以降雪的形式到达地面形成积雪,且积雪主要集中在海拔5000 m以上范围[27],特殊的地理位置和海拔高度使其环境条件有利于冰川发育。已有的研究结果显示,近几十年来喀喇昆仑山区夏季平均气温和最低气温都呈下降趋势[28]。随着近年来夏季和冬季降水的增加,增加的水汽在喀喇昆仑山上空逐渐积累,造成冷却异常[29],形成了丰富的固态降水[30]。de Kok等[31]表明昆仑山西部和喀喇昆仑地区降雪增加和温度敏感性低是冰川增长或稳定的主要原因。塔河南部昆仑山和喀喇昆仑山地区降水增加伴随冰川积累是该地区水储量增加的重要原因。

通过进一步对塔河各流域水储量变化同温度和降水相关性分析发现,渭干-库车河和阿克苏河流域水储量同温度变化存在显著的相关性(P<0.05)。自2000年以来,2个流域气温均呈现显著增加,这也进一步证明了温度上升是造成渭干-库车河和阿克苏河流域水储量下降的重要原因。塔河流域降水主要集中在山区,自1980s以来,流域山区变得更加湿润[32],山区降水的增加在一定程度上补充了区域水资源[33]。过去20 a塔河流域绝大多数站点年降水量都呈增加趋势,尤其是高海拔区。2000—2021年塔河流域南部陆地水储量波动趋于平稳,流域南部主要接受来自昆仑山的冰川融水补给,水源较为丰富,流域内陆地水储量整体呈稳步增加趋势。

塔河流域植被覆盖分布于山体多的地带、绿洲及绿洲荒漠交错带,而近年来大部分地区气温增温幅度下降并伴随降水增多也是影响塔河流域生态环境转好的重要因素,包括NDVI、植被覆盖度和NPP增加。相较于中亚干旱区的加剧而造成的碳源面积显著扩大[14],塔河生态环境的转好将在一定程度上减少碳源区,一些区域或已成为碳汇区。

3.2 人为因素

绿洲作为干旱区重要的人地关系地域系统,受人类活动影响较为强烈。2000年以来,塔河流域耕地面积扩张15324 km^2(56.95%),其中孔雀河和车尔臣河绿洲区耕地面积扩张面积最大,分别为130.81%和142.13%;森林和草地面积分别减少1150 km^2(8.36%)和17639 km^2(7.28%),其中,博斯腾湖区森林面积减少了约90%,孔雀河草地面积减少了约57%。2000—2020年塔河流域未利用土地面积(主要包含沙漠、裸地等类型)增加2.91%。除迪那河和策勒-克里雅河未利用地面积略显增加外,其余各流域未利用地面积均不同程度缩减。

绿洲区耕地面积的日益扩大,不断挤占荒漠绿洲过渡带是导致荒漠绿洲过渡带萎缩和植被退化

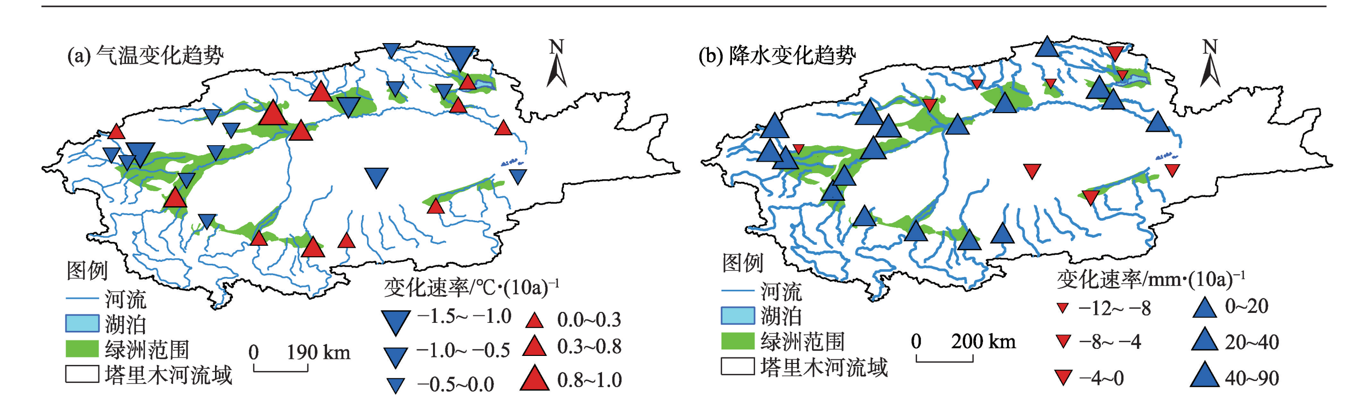


图8 2000—2020年塔河流域气温和降水空间变化特征

Fig. 8 Spatial variations of temperature and precipitation in the Tarim River Basin during 2000—2020

的重要原因。据2016年新疆统计年鉴，有超过 1100×10^4 人次、2819×10^3 hm^2 的农业面积和超过1/3的地区面临水资源压力(World Resources Institute's Aqueduct Global Water Risk Map, http://www.wri.org/our-work/project/aqueduct)。塔河流域北部天山南坡，为塔河流域绿洲的主要分布区，近年来耕地规模的急剧扩大，导致河道断流和地下水过度开发并引发区域陆地水储量的减少[34]。2000年以来，国家加大塔河流域生态保护力度和重视程度，已累计向塔河下游生态输水21次，累计输水量达 88.45×10^8 m^3[35]。自生态输水以来，塔河下游天然森林植被恢复显著[36]，地下水位抬升约4~5 m[37]，输水漫溢区植被盖度的平均增长速率最高可达未输水区的4~5倍[38]，流域NPP增速达0.40 g C·m^{-2}·a^{-1}[39]。在人类活动影响下，近年来塔河下游地表植被覆盖度增加，塔河下游生态退化趋势基本得到遏制。

4 结 论

(1) 塔河流域绿洲面积自2000年至2020年呈现增加趋势，由2000年的 6.41×10^4 km^2 增至2020年的 6.82×10^4 km^2，绿洲面积扩张了 0.42×10^4 km^2 (6.49%)；绿洲区生态环境转好，生态改善区占69%，而生态退化区不足5%。

(2) 绿洲动态变化方面，流域绿洲NDVI由2000年的0.13增至2020年的0.16，绿洲植被覆盖度在近20 a扩张36.79%，伴随流域NPP增加31.55%。空间上，塔河各流域NDVI、植被覆盖度和NPP均呈现明显增加趋势，其中以北部天山地区各流域和西部喀什噶尔河流域绿洲NDVI、植被覆盖度和NPP增加最为显著，其次为南部各流域，东南部各流域绿洲扩张最为缓慢。

(3) 气候变化影响下，2002—2020年塔河流域陆地水储量以0.27 mm·月$^{-1}$速率减少，且存在明显的空间差异，表现为流域北部和西部区域陆地水储量显著减少，而南部区域陆地水储量显著增加。气温升高导致山区冰雪消融加速是塔河北区水储量减少的直接原因，山区降水的显著增加伴随降温在一定程度上补给了塔河南部陆地水资源储量。人类活动影响是塔河流域绿洲动态变化的主要驱动力，伴随上游来水量的增加，人类加大水资源配置促使其他土地类型转向耕地和城镇居民用地，加大绿洲区未利用地开发，促使绿洲区面积显著增长。

参考文献(References)

[1] Sun F, Wang Y, Chen Y N, et al. Historic and simulated desert-oasis ecotone changes in the arid Tarim River Basin, China[J]. Remote Sensing, 2021, 13(4): 647, doi: 10.3390/rs13040647.

[2] Huang J, Ji F. Effects of climate change on phenological trends and seed cotton yields in oasis of arid regions[J]. International Journal of Biometeorology, 2015, 59(7): 877-888.

[3] Hao X M, Hao H C, Zhang J J. Soil moisture influenced the variability of air temperature and oasis effect in a large inland basin of an arid region[J]. Hydrological Process, 2021, 35(6), e14246, doi: 10.1002/hyp.14246.

[4] Li C J, Fu B J, Wang S, et al. Drivers and impacts of changes in China's drylands[J]. Nature Reviews Earth and Environment, 2021, 2(12): 858-873.

[5] 陈亚宁, 郝兴明, 陈亚鹏, 等. 新疆塔里木河流域水系连通与生态保护对策研究[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(10): 1156-1164. [Chen Yaning, Hao Xingming, Chen Yapeng, et al. Study on water system connectivity and ecological protection countermea-

sures of Tarim River Basin in Xinjiang[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(10): 1156-1164.]

[6] 陈亚宁, 陈亚鹏, 朱成刚, 等. 西北干旱荒漠区生态系统可持续管理理念与模式[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7410-7417. [Chen Yaning, Chen Yapeng, Zhu Chenggang, et al. The concept and mode of ecosystem sustainable management in arid desert areas in northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7410-7417.]

[7] 陈亚宁, 李稚, 方功焕, 等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 18-26. [Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan, et al. Impact of climate change on water resources in the Tianshan Mountians, Central Asia[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 18-26.]

[8] Zhang Z T, Xu E Q, Zhang H Q. Complex network and redundancy analysis of spatial-temporal dynamic changes and driving forces behind changes in oases within the Tarim Basin in northwestern China [J]. Catena, 2021, 201: 105216, doi: 10.1016/j.catena.2021.105216.

[9] Li Z, Chen Y N, Zhang Q F, et al. Spatial patterns of vegetation carbon sinks and sources under water constraint in Central Asia [J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125355, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125355.

[10] 孙帆, 王弋, 陈亚宁. 塔里木盆地荒漠-绿洲过渡带动态变化及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3397-3407. [Sun Fan, Wang Yi, Chen Yaning. Dynamics of desert-oasis ecotone and its influencing factors in Tarim Basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(10): 3397-3407.]

[11] Pei Z F, Fang S B, Yang W N, et al. The relationship between NDVI and climate factors at different monthly time scales: A case study of grasslands in Inner Mongolia, China (1982—2015) [J]. Sustainability, 2019, 11(24): 7243, doi: 10.3390/su11247243.

[12] Liu Y, Li L H, Chen Xi, et al. Temporal-spatial variations and influencing factors of vegetation cover in Xinjiang from 1982 to 2013 based on GIMMS-NDVI3g[J]. Global and Planet Change, 2018, 169: 145-155.

[13] Shi G, Ye P, Ding L, et al. Spatio-temporal patterns of land use and cover change from 1990 to 2010: A case study of Jiangsu Province, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(6): 907, doi: 10.3390/ijerph16060907.

[14] Zhang J J, Hao X M, Hao H C, et al. Climate change decreased net ecosystem productivity in the arid region of Central Asia[J]. Remote Sensing, 2021, 13(21): 4449, doi: 10.3390/rs13214449.

[15] Gao P W, Kasimu A, Zhao Y Y, et al. Evaluation of the temporal and spatial changes of ecological quality in the Hami oasis based on RSEI[J]. Sustainability, 2020, 12(18): 7716, doi: 10.3390/su12187716.

[16] Wang J, Liu D W, Ma J L, et al. Development of a large-scale remote sensing ecological index in arid areas and its application in the Aral Sea Basin[J]. Journal of Arid Land, 2021, 13(1): 40-55.

[17] 李鹏辉, 徐丽萍, 刘笑, 等. 基于三维生态足迹模型的天山北麓绿洲生态安全评价[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1337-1345. [Li Penghui, Xu Liping, Liu Xiao, et al. Ecological security evaluation of an oasis in the north of the Tianshan Mountains based on three-dimensional ecological footprint model[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5):1337-1345.]

[18] Fang G H, Yang J, Chen Y N, et al. How hydrologic processes differ spatially in a large basin: Multisite and multiobjective modeling in the Tarim River Basin[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123: 7098-7113.

[19] Zhang Q F, Chen Y N, Li Z, et al. Recent changes in water discharge in snow and glacier melt-dominated rivers in the Tienshan Mountains, Central Asia[J]. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2704, doi: 10.3390/rs12172704.

[20] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 811-841.

[21] Chen Y N, Li W H, Deng H J, et al. Changes in Central Asia's water tower: Past, present and future[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 35458, doi: 10.1038/srep35458.

[22] Farinotti D, Longuevergne L, Moholdt G, et al. Substantial glacier mass loss in the Tien Shan over the past 50 years[J]. Nature Geoscience, 2015, 8(9): 716-722.

[23] Gao L, Deng H J, Lei X Y, et al. Evidence for elevation-dependent warming from the Chinese Tianshan Mountains[J]. Cryosphere, 2021, 15(12): 5765-5783.

[24] Liu J, Lawson D E, Hawley R L, et al. Estimating the longevity of glaciers in the Xinjiang region of the Tian Shan through observations of glacier area change since the Little Ice Age using high-resolution imagery[J]. Journal of Glaciology, 2020, 66(257): 471-484.

[25] 向燕芸, 陈亚宁, 张齐飞, 等. 天山开都河流域积雪、径流变化及影响因子分析[J]. 资源科学, 2018, 40(9): 1855-1865. [Xiang Yanyun, Chen Yaning, Zhang Qifei, el al. Trends of snow cover and streamflow variation in Kaidu River and their influential factors[J]. Resources Science, 2018, 40(9): 1855-1865.]

[26] 邓海军,陈亚宁. 中亚天山山区冰雪变化及其对区域水资源的影响[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1309-1323. [Deng Haijun, Chen Yaning. The glacier and snow variations and their impact on water resources in mountain regions: A case study in Tianshan Mountains of Central Asia[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1309-1323.]

[27] Bonekamp P N J, Kok R J, Collier E, et al. Contrasting meteorological drivers of the glacier mass balance between the Karakoram and central Himalaya[J]. Frontiers in Earth Science, 2019, 7: 107, doi: 10.3389/feart.2019.00107.

[28] 李海娟. 近30年喀喇昆仑山东部北坡主要冰川变化的遥感监测[D]. 昆明: 云南大学, 2021. [Li Haijuan. Remote sensing study on main glacier changes in the past 30 years on the north slope of the eastern Karakoram[D]. Kunming: Yunnan University, 2021.]

[29] Dimri A P. Decoding the Karakoram anomaly[J]. Science of the To-

tal Environment, 2021, 788(7): 147864, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147864.

[30] Farinotti D, Immerzeel W W, de Kok R J, et al. Manifestations and mechanisms of the Karakoram glacier anomaly[J]. Nature Geoscience, 2020, 13(1): 8-16.

[31] de Kok R J, Kraaijenbrink P D A, Tuinenburg O A, et al. Towards understanding the pattern of glacier mass balances in High Mountain Asia using regional climatic modelling[J]. The Cryosphere, 2020, 14(9): 3215-3234.

[32] Zhang Y, An C B, Liu L Y, et al. High mountains becoming wetter while deserts getting drier in Xinjiang, China since the 1980s[J]. Land, 2021, 10(11): 1131, doi: 10.3390/land10111131.

[33] 李玉焦, 陈亚宁, 张齐飞, 等. 1960—2018年博斯腾湖水位变化特征及其影响因素分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 48-58. [Li Yujiao, Chen Yaning, Zhang Qifei, et al. Analysis of the change in water level and its influencing factors on Bosten Lake from 1960 to 2018[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 48-58.]

[34] Deng H J, Chen Y N, Li Q H, et al. Loss of terrestrial water storage in the Tianshan Mountains from 2003 to 2015[J]. International Journal of Remote Sensing, 2019, 40(22): 8342-8358.

[35] 陈亚宁, 吾买尔江·吾布力, 艾克热木·阿布拉, 等. 塔里木河下游近20 a输水的生态效益监测分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 605-611. [Chen Yaning, Wubuli Wumaierjiang, Abula Aikeremu, et al. Monitoring and analysis of ecological benefits of water conveyance in the lower reaches of Tarim River in recent 20 a[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 605-611.]

[36] 张久丹, 李均力, 包安明, 等. 2013—2020年塔里木河流域胡杨林生态恢复成效评估[J]. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1824-1835. [Zhang Jiudan, Li Junli, Bao Anming, et al. Effectiveness assessment of ecological restoration of *Populus euphratica* forest in the Tarim River Basin during 2013—2020[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(6): 1824-1835.]

[37] 陈永金, 艾克热木·阿布拉, 张天举, 等. 塔里木河下游生态输水对地下水埋深变化的影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 651-658. [Chen Yongjin, Abula Aikeremu, Zhang Tianju, et al. Effects of ecological water conveyance on groundwater depth in the lower reaches of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 651-658.]

[38] 王振，李均力，张久丹，等. 输水漫溢对塔里木河中游胡杨林恢复的影响[J]. 干旱区地理, 2023, 46(1): 94-102. [Wang Zhen, Li Junli, Zhang Jiudan, et al. Influences of ecological water conveyance on *Populus euphratica* forest restoration in the middle reaches of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(1): 94-102.]

[39] 张静静, 郝海超, 郝兴明, 等. 塔里木河下游生态输水对天然植被NPP的影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 708-717. [Zhang Jingjing, Hao Haichao, Hao Xingming, et al. Effects of ecological water conveyance on NPP of natural vegetation in the lower reaches of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 708-717.]

Changes in terrestrial water storage and evaluation of oasis ecological security in the Tarim River Basin

ZHANG Qifei[1,2], CHEN Yaning[2], SUN Congjian[1,2], XIANG Yanyun[3], HAO Haichao[4]

(1. School of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, Shanxi, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. School of Public Administration, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, Shanxi, China; 4. School of Geographical Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Oases are unique and ecologically sensitive landscape types in arid and semiarid regions and play a crucial role in sustaining human survival and socioeconomic development. However, climatic changes and human activities are causing drastic changes to water resources and the oasis eco-environment. This study analyzes terrestrial water storage changes and assesses the ecological security of oases in the Tarim River Basin of Xinjiang, China. The assessment was performed using the fraction of vegetation cover, a remote sensing ecological index, and net primary productivity (NPP) using the Carnegie-Ames-Stanford approach. The analysis used moderate-resolution imaging spectroradiometer satellite images, GRACE data, land use data, and climatic gridded and observed data from 2002 to 2020. The results indicate the following: (1) Terrestrial water storage in the Tarim River Basin decreased at a rate of 0.27 mm per month. Spatially, terrestrial water storage in the northern and western regions of the Tarim River Basin exhibited a negative trend, whereas that in the southern regions of the Basin showed a positive trend. (2) The total oasis area in the Tarim River Basin expanded by 6.49% (0.42×10^4 km^2) from 2000 to 2020. The ecological security of the basin improved, and the eco-environment ranged from poor to general grade. Approximately 69% of the region's eco-environment improved, whereas the area of ecological degradation was less than 5%. The normalized difference vegetation index increased from 0.13 in 2000 to 0.16 in 2020, the fraction of vegetation cover increased by 36.79%, and the NPP expanded by 31.55% in the past 20 years. (3) Rising temperatures and precipitation contributed to increased downstream river runoff and spatiotemporal variability of water resources in the Tarim River Basin. However, human activities are a key factor in the expansion of oases.

Key words: terrestrial water storage; oasis dynamic change; evaluation of oasis ecological security; Tarim River Basin